

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ» (НИЯУ
МИФИ)»

УДК 539.1

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ НА SIRM ПРИ
ПОМОЩИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA328P**

Научный руководитель
старший преподаватель
научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»

_____ Ф. А. Дубинин

Студент

_____ А. Д. Конотоп

Москва 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Позитронно-эмиссионный томограф для животных	5
1.1 Принципы работы ПЭТ	5
1.2 Сцинтилляционные детекторы	6
1.2.1 Сцинтилляционные материалы	7
1.2.2 Фотоумножители	8
1.3 Плата Petiros 2A	12
1.4 Макет 32-канального ПЭТ	13
1.5 Характеристики макета 32-канального ПЭТ	14
2 Подстройка напряжений на каналах	17
2.1 Схема подстройки напряжений на базе операционного усилителя	18
2.2 Модификация схемы подстройки напряжения	20
2.3 Внедрение цифрового управления подстройкой напряжений . . .	22
2.3.1 Механизм обратной связи	22
2.3.2 Подбор необходимой электроники	23
2.3.3 Программное обеспечение	26
2.4 Описание установки	29
2.5 Пути улучшения	34
Список литературы	36

ВВЕДЕНИЕ

Одной из передовых технологий по исследованию функциональных особенностей и структур тканей организма является позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), хорошо зарекомендовавшая себя в области диагностики злокачественных новообразований. [1]. При проведении ПЭТ-исследования, в организм вводится специальный радиофармпрепарат, содержащий изотопы, распадающиеся с испусканием позитронов, который поглощается раковыми клетками и служит маркером при сканировании. Пролетев небольшое расстояние, родившиеся позитроны аннигилируют с электронами тканей, в результате чего рождаются два γ -кванта, разлетающиеся на угол, близкий к 180° . Излучение регистрируется при помощи кольца из детекторов, расположенных вокруг источника, на основании отклика которых формируется визуальная модель, отражающая местоположение опухоли [2].

В настоящее время рынок ПЭТ в основном представлен зарубежными решениями от крупных производителей медицинского оборудования: Philips, Siemens, General Electric Healthcare и другие. В основе таких установок лежат сборки из неорганического сцинтилляционного кристалла (обычно применяются кристаллы BGO (германат висмута) или LSO (силикат Лютеция)) и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Также ПЭТ дополняется установкой для МРТ/КТ, что позволяет сопоставить информацию о местоположении злокачественного образования с его положением внутри организма. Подобная интеграция значительно усложняет процесс разработки, что связано с усложнением общей компоновки конструкции, а также с высокой чувствительностью ФЭУ к внешнему электромагнитному полю и влиянию на корректную работу детектора в случае применения МРТ.

В лаборатории детекторов ядерной медицины, организованной на базе лаборатории физики редких процессов института имени Курчатова и кафедры физики элементарных частиц и космологии, ведётся разработка макета позитронно-эмиссионного томографа для животных. По результатам работы в рамках бака-

лавриата представлена система подстройки напряжений вручную на базе дифференциального каскада. В данной работе продолжается развитие данного решения до системы подстройки напряжений на базе операционного усилителя при помощи микроконтроллера ATmega328P.

1 ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННЫЙ ТОМОГРАФ ДЛЯ ЖИВОТНЫХ

1.1 ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПЭТ

Позитронно-эмиссионная томография — это метод исследования, который позволяет изучать структуру и функциональные особенности тканей организма. ПЭТ считается эффективным инструментом для диагностики злокачественных новообразований.

В ходе ПЭТ-исследования в организм пациента вводят специальный радиофармпрепарат (РФП). В онкологии чаще всего используется фтордезоксиглюкоза (ФДГ) [3].

ФДГ является аналогом глюкозы, которая играет ключевую роль в обмене веществ, участвуя в качестве источника энергии для клеток организма. Раковые клетки поглощают ФДГ быстрее, чем здоровые, что приводит к увеличению концентрации препарата в опухоли по сравнению с окружающими тканями. Это делает ФДГ эффективным маркером для обнаружения опухолей при сканировании.

В составе ФДГ используется изотоп фтор-18, который характеризуется длительным периодом полураспада (109.8 минуты) и низкой энергией излучения. Это обеспечивает высокое качество изображений с хорошим пространственным разрешением. Кроме того, благодаря длительному периоду полураспада, препарат можно транспортировать из места хранения до места проведения сканирования.

Однако фтор-18 имеет недостаток, который заключается в его способности накапливаться в тканях мозга и почек. Это может привести к ложному обнаружению патологий в этих органах даже при отсутствии заболеваний.[1].

Радиоактивная метка подвергается β^+ -распаду, в результате которого родившиеся позитроны, пролетев небольшое расстояние (в среднем 3-4 мм [4]), ан-

нигилируют с электронами тканей, в результате чего рождаются два γ -кванта, разлетающиеся на угол, близкий к 180° . Отклонение от коллинеарности в среднем составляет около 0.23° , что при 80-см диаметре кольца приводит к потере в разрешении около 1.7 мм [5]. Энергия аннигиляционных γ -квантов составляет 511 кэВ. Частицы регистрируются при помощи расположенных вокруг источника излучения детекторов, на основании отклика которых строится визуализация, отражающая местоположение опухоли в организме, её размеры и форму.

Таким образом, детекторы ПЭТ для человека должны удовлетворять следующему набору характеристик[1]:

- 1) эффективность регистрации отдельного γ -кванта с энергией 511 кэВ – не ниже 80%;
- 2) пространственное разрешение – несколько миллиметров;
- 3) высокое временное разрешение, порядка нескольких наносекунд;
- 4) энергетическое разрешение < 100 кэВ ПШПВ при энергии 511 кэВ для отсеивания событий комптон-эффекта;
- 5) возможность работы при нагрузках до $10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^2$ временного окна.

1.2 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Одним из элементов большинства установок по изучению частиц являются детекторы. Существует огромный спектр подобных приборов, разработанных под определённые задачи: искровые камеры для изучения треков частиц, счётчик Гейгера для подсчёта количества частиц, масс-спектрографы для изучения состава веществ.

Сцинтилляционные детекторы находят широкое применение для регистрации частиц и, в частности, γ -квантов. Их популярность обусловлена высокой эффективностью и слабой зависимостью от энергии гамма-квантов в различных энергетических диапазонах. Принцип работы таких детекторов основан на преобразовании ионизирующего излучения в видимый свет при помощи сцинтилляционного материала. Световой сигнал улавливается фотоумножителем, преобразует его в электронный и усиливает, регистрируя его.

1.2.1 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сцинтилляционные вещества, как было сказано, реагируют на проходящие через них потоки частиц, излучая некоторое количество фотонов пропорциональное энергии пролетающей частицы. Благодаря чему появляется возможность получать энергетические спектры различных источников ионизирующих излучений. Существует большое количество сцинтилляционных материалов: пластиковые сцинтилляторы, характеризующиеся малым временем высвечивания, газовые сцинтилляторы из азота и благородных газов, имеющие ещё более короткое время высвечивания. Особое место занимают неорганические сцинтилляционные кристаллы, для которых характерен высокий световыход и достаточное энергетическое разрешение, что позволяет говорить о энергетических характеристиках исследуемых частиц и, соответственно, разделять их по энергиям. В таблицах 1.1 и 1.2 приведены интересующие нас характеристики некоторых сцинтилляционных материалов.

Таблица 1.1 — Характеристики сцинтилляторов [6] *среднее значение

Сцинтиллятор	плотность $\frac{\Gamma}{\text{см}^2}$	Время высвечивания, нс	Световыход, $\frac{\Phi}{\text{кэВ}}$
Полистирол	1.05	5	0.1
GAGG(Ce)	6.63	87(90%)255(10%)	56*
LYSO(Ce)	7.2	40	32
BGO	7.13	300	10

В качестве сцинтиллятора применяется сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(Ce)$, *гадолиний-алюминий-галлиевый гранат, активированный ионами церия*), произведённый компанией OST Photonics. Материал обладает привлекательными для гамма-спектрометров характеристиками, что вызывает высокий интерес к его изучению, высокая плотность, так как при увеличении этого параметра кристалла кванты эффективнее теряют энергию в материале в силу зависимости этих величин, позволяя детектировать кванты высоких энергий, высоким зарядовым числом, влияющим на сечение взаимодействия фотоэффекта ($\sigma_{ph} \sim Z_{eff}^5$), сравнительно небольшим временем высвечивания, достаточно высоким световыходом (~ 56000 ф/МэВ, $T = 293K$), что позволяет более точно измерять энергию падающих на него γ -

квантов при подходящих нам значениях энергетического разрешения ($\sim 9\%$), а также отсутствие гигроскопичности и собственного излучения.

Как видно из таблицы 1.2, в сравнении с традиционными сцинтилляторами, такими как NaI(Tl), CsI(Tl), BGO, или более современным его прямым конкурентом в лице LYSO(Ce), выбранный нами кристалл не только не хуже, но и превосходит аналоги по многим параметрам. Кроме того, GAGG(Ce), как более новый среди остальных, является интересным с точки зрения изучения его характеристик. Отдельно хочется отметить, что технология выращивания не является патентной, что позволяет свободно в полной мере производить и закупать данные кристаллы повсеместно, но вносит свои особенности в разброс характеристик (например, сильный разброс величины световыхода от производителя к производителю).

Как итог, GAGG(Ce) можем считать хорошей альтернативой кристаллов LYSO(Ce), чаще всего использующийся в сцинтилляционных детекторах для задач медицинской физики. GAGG представляет исследовательский интерес его применимости совместно с кремниевыми фотоумножителями, принцип действия которых отписывается далее, так как это относительно новый материал. В частности, поскольку GAGG имеет относительно высокую плотность, он может быть привлекательным вариантом для тех применений обнаружения γ -излучения, где эффективность детектирования является критическим фактором, как, например, ПЭТ, объединенная с магнитно-резонансным томографом (ПЭТ/МРТ). Сейчас продолжаются исследования, которые показали, что в связи с активацией его на свету и последующим продолжительным высвечиванием есть необходимость предварительного выдерживания его в темноте для достижения наилучшего разрешения детектора.

1.2.2 ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

Вышедших из сцинтиллятора фотонов достаточно мало чтобы обрабатывать напрямую сигнал с какого-либо фотоприёмника. Для устранения этого недостатка применяются особые фотоприёмники, содержащие в своей конструкции преобразователи попадающих на них фотонов в электроны с последующим умножением числа частиц. Одним из подобных устройств являются фотоэлектронные умножители, представленный на рисунке 1.1.

Таблица 1.2 — Сравнительные характеристики распространенных сцинтилляционных кристаллов. [7–10]

	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	BGO	NaI(Tl)	GAGG(Ce)
Плотность (г/см ²)	4,51	7,2	7,13	3,67	6,63
Эффективный Z_{eff} (атомный) номер	54	65	73	50	54,4
Длина вол- ны мах высвечива- ния (нм)	550	420	480	415	520
Время вы- свечивания (нс)	1050	40	300	230	87(90%)255(10%)
Световыход (фото- ны/кэВ)	54	32	10	38	40-45
Гигроско- пичность	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА	НЕТ
Собственная радиоактив- ность	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ

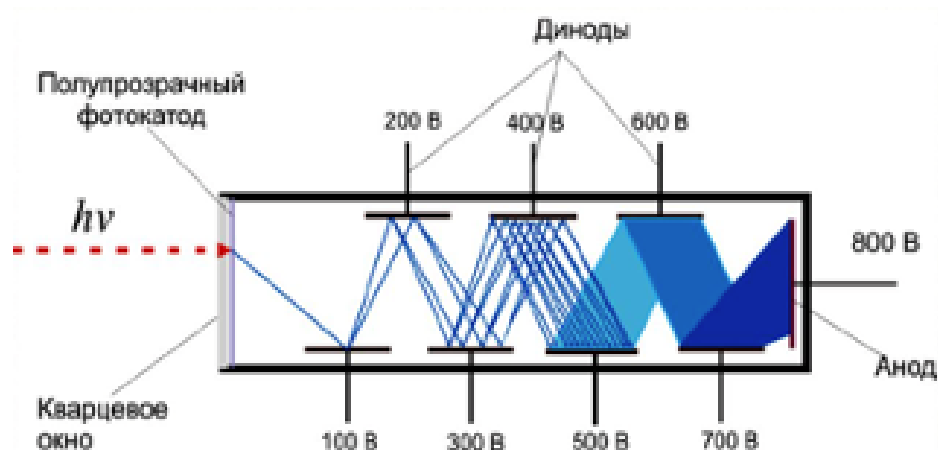


Рисунок 1.1 — Схема ФЭУ

Фотон проходит через кварцевое окно и, попадая на полупрозрачный фотокатод, рождает фотоэлектрон, который в свою очередь падает на динод, выбивая несколько вторичных фотоэлектронов, которые летят к следующему диноду и далее, пока волна фотоэлектронов в сотни тысяч раз большая, чем одна

частица, не достигнет анода. Такие фотоприёмники являются достаточно громоздкими, требуют сложных в изготовлении источников питания, восприимчивы к внешним магнитным полям, что усложняет их использование в паре с МРТ, а также являются достаточно хрупкими, из-за чего требуют в эксплуатации особой осторожности.

Решением в области детектирования слабых излучений являются кремниевые фотоумножители (SiPM), представленные ниже на рисунке 1.2.

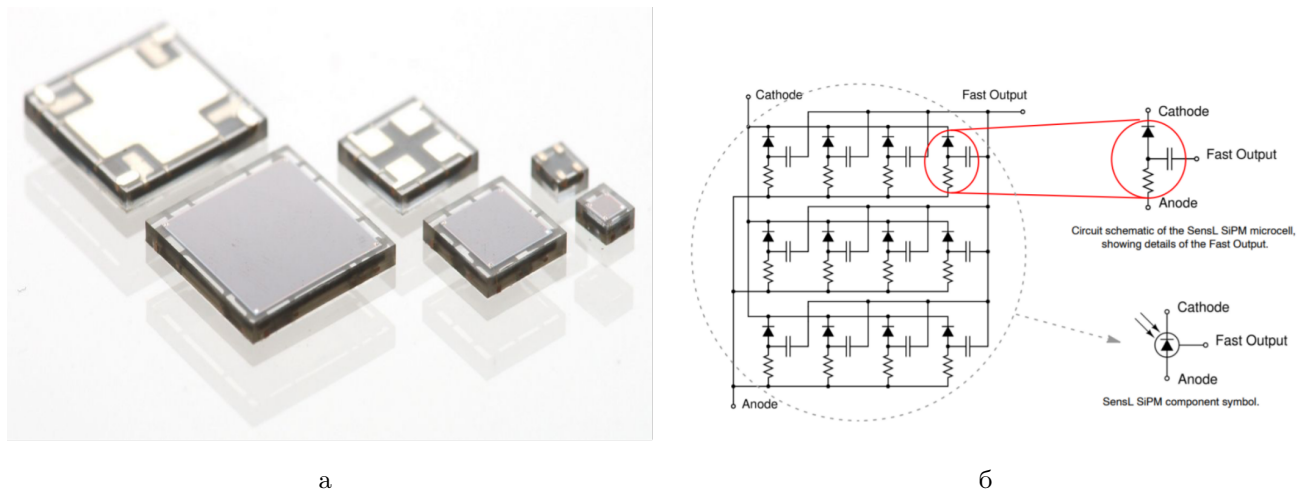


Рисунок 1.2 — Кремниевый фотоумножитель от компании Onsemi (а) и принципиальная схема кремниевого фотоумножителя (б)

Данный фотоприёмник представляет из себя матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD), работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы SiPM представлен на рисунке 2, у разных производителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины. За счёт своих малых габаритов и высокого коэффициента усиления (порядка 10^6) SiPM не только приходит на замену ФЭУ во многих задачах, но и выходит за пределы применимости этого типа фотоприёмников в области компактности и устойчивости к внешним магнитным полям и используется для детектирования различных слабых сигналов. [11]

В нашей установке применяются кремниевые фотоумножители (SiPM) Onsemi FC30035.

Данные фотоумножители отличаются от своих конкурентов достаточно низким рабочим напряжением питания (30 В), а также высоким значением эффективности регистрации фотонов (PDE) и малым разбросом напряжения пробоа. Эта линейка датчиков обладает высоким коэффициентом усиления [12],

Размер сенсора	Размер ячейки	Параметр	Тип.
3мм	35μ	Напряжение открытия (V_{br} , В)	24.2 - 24.7
		Пик длины волны (λ_p), нм	420
		PDE, %	$31(V_{br} + 2.5)V$
		Усиление	3×10^6
		Темновой счёт, кГц	300 - 860

Таблица 1.3 — Характеристики кремниевого умножителя Onsemi FC30035

чувствительных в однофотонном режиме от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона при значении длины волны 420 нм.

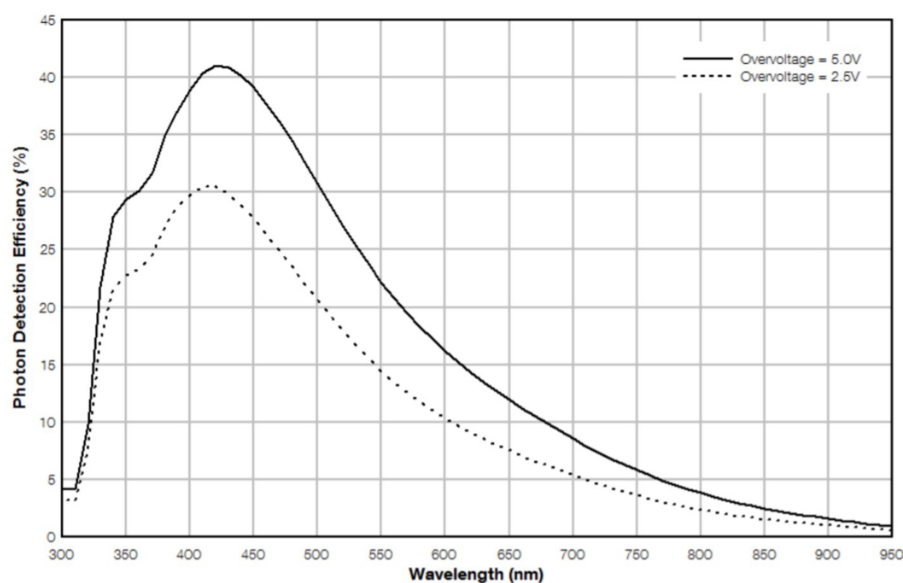


Рисунок 1.3 — Зависимость PDE от длины волны при разных значениях переполюсовки

На рисунке 1.3 представлена зависимость PDE от длины волны регистрируемого излучения для различных значений напряжения смещения. Данный параметр является отражением чувствительности кремниевого фотоумножителя, или отношением числа частиц, зарегистрированных за время измерения к числу частиц, попавших в детектор за тоже время. Определяется как:

$$PDE(\lambda, T, U) = Q_E(\lambda, T)\mathcal{E}_g P_G(\lambda, T, U) \quad (1.1)$$

где $Q_E(\lambda)$ – квантовая эффективность чувствительной площади фотодетектора, λ – длина волны регистрируемого излучения, \mathcal{E}_g – геометрическая эффективность, равная отношению чувствительной площади, к полной площади кремниевого фотоумножителя, $P_G(\lambda, T, U)$ – вероятность того, что образовавшийся фотоэлектрон вызовет пробой, значение которой возрастает с увеличением перенапряжения U , зависящего от температуры T .

Для каждого датчика собрана схема подключения на индивидуальной плате, питание которой осуществляется от единого источника. Для дальнейшей калибровки SiPM были определены рабочие точки, которые представляют собой оптимальное значение напряжения смещения, при котором достигается наилучшее энергетическое разрешение детектора. Этот параметр зависит от коэффициента усиления, растущего при увеличении напряжения, и PDE.

Производитель в технической документации указывает среднее значение напряжения пробоя, однако существует необходимость тестировать каждый отдельно, так как, на практике, у разных SiPM одной серии они могут значительно отличаться.

1.3 ПЛАТА PETIROC 2A

За основу установки взята тестовая плата на базе интегральной схемы специального назначения (*ASIC*) **Petiroc 2A**, разработанная компанией Weegoc. Данная интегральная микросхема создавалась специально для считывания данных с SiPM), в том числе измерение времени срабатывания детекторов с последующим анализом и обработкой в соответствующем ПО.

Чип обладает набором из 32-х биполярных каналов, к которым можно подключить как одиночные SiPM, так и целые матрицы. Основная концепция данной микросхемы – комбинирование двух измерений (времени регистрации сигнала и его амплитуды) независимым образом. Временной триггер срабатывает по переднему фронту сигнала (начало сцинтилляционной вспышки), амплитудное значение достигается, когда большая часть фотонов вспышки собрана на SiPM, а за амплитуду – величина засвета всего сцинтилляционного кристалла.

Сигнал с фотоумножителя поступает на плату и разделяется на два: вре-

менную и зарядовую ветвь. Первичный отбор производится на основе срабатывания триггера временного канала, также могут быть применены отборы на основе триггера зарядового канала и на основе совпадений.

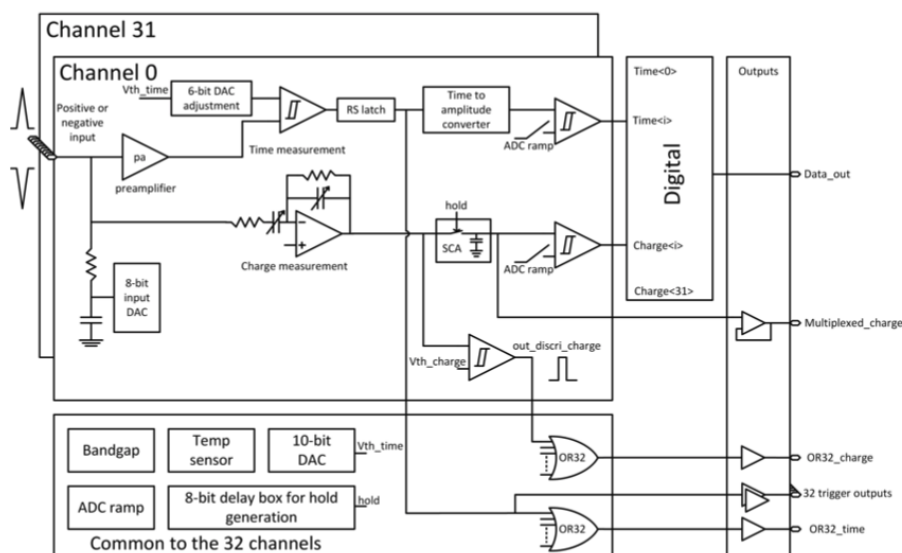


Рисунок 1.4 — Принципиальная схема тестовой платы Petiros 2A

Пришедший сигнал, предварительно усиленный на предусилителе, оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя, а полученные величины передаются в ячейки памяти (по четыре ячейки на событие для каждого канала), которые затем силами как прилагаемого программного обеспечения, так и при помощи стороннего, можно проанализировать и получить необходимые результаты.

1.4 МАКЕТ 32-КАНАЛЬНОГО ПЭТ

Макет 32-канального ПЭТ (позитронно-эмиссионный томограф) представляет собой установку, разработанную лабораторией детекторов ядерной медицины НИЯУ «МИФИ» и НИЦ «Курчатовский институт». Сцинтилляционные детекторы размещаются в специальных канавках, сделанных внутри поликарбонатного кольца, что придаёт установке прочность и избавляет от нежелательных смещений. Внешний радиус кольца составляет 160 мм, внутренний –

90 мм, толщина – 10 мм. Всего размещено 32 детектора, что связано с ограничениями электроники – анализатор не рассчитан на большее число каналов. Сбор сигнала осуществляется через шлейф, присоединенный на входные pin-контакты платы. Установка в сборе представлена на рисунке 1.5.

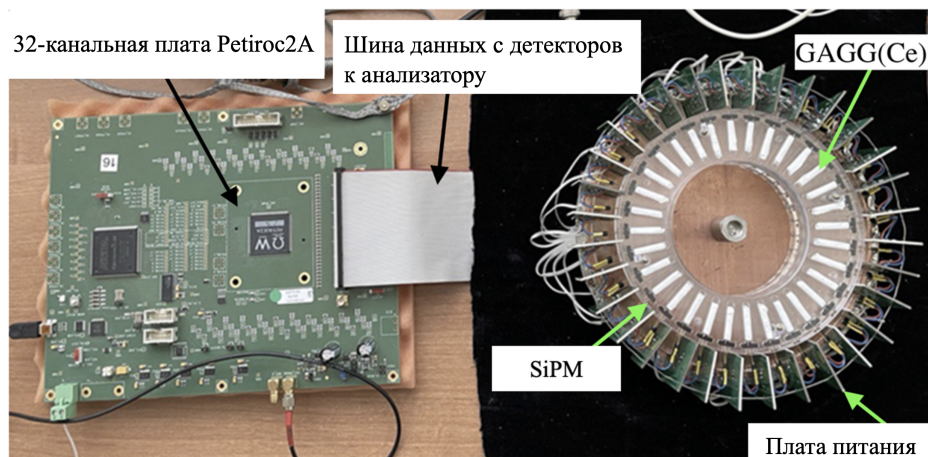


Рисунок 1.5 — Внешний вид макета 32-канального ПЭТ

1.5 ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА 32-КАНАЛЬНОГО ПЭТ

Ранее собранный макет 32-канального ПЭТ проходил проверку на различных источниках, благодаря чему удалось изучить ряд его характеристик. Для данных исследований была подготовлена отдельная установка, представляющая собой чёрный ящик, внутри которого располагается детекторная сборка и необходимая для работы с ней электроника [13], были измерены характеристики откликов каналов, такие как положения пика, а также энергетическое разрешение для различных комбинаций SiPM и сцинтиллятора, дополнительно получены данные по энергетическому разрешению для одиночного детектора. Так, для пика в области 662 кэВ, изображённого на рисунке 1.6, источника ^{137}Cs , составило $\sim 8\%$, что позволяет различать его с приемлемой точностью.



Рисунок 1.6 — Спектр источника ^{137}Cs , полученный на установке для тестирования кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов

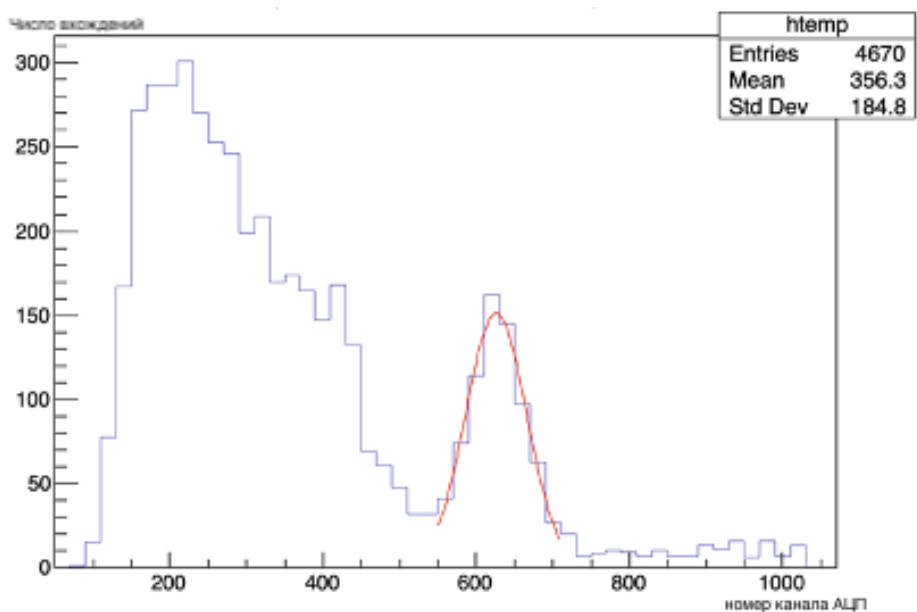


Рисунок 1.7 — Спектр источника ^{44}Ti , полученный на одном канале макета 32-детекторного ПЭТ

В качестве второго источника для изучения характеристик установки был выбран ^{44}Ti за счёт своей моды низкоэнергетического β^+ -распада, что позволяет использовать его в качестве эталона для восстановления изображения с макета 32-канального ПЭТ. Источник размещался в центре установки и для каждой противоположной пары детекторов производился поиск совпадений в заданном временном окне. Для данного изотопа получено энергетическое разрешение 14% для пика 511 кэВ (рисунок 1.7), а временное разрешение составило порядка 1.8 нс. О результатах данных исследований было доложено в рамках

международной конференции AYSS, прошедшей в ОИЯИ в Дубне, информация по докладу изложена в статье [14].

2 ПОДСТРОЙКА НАПРЯЖЕНИЙ НА КАНАЛАХ

В качестве решения по подстройке напряжений в рамках дипломной работы была предложена схема на базе дифференциального каскада, изображённого на рисунке 2.1.

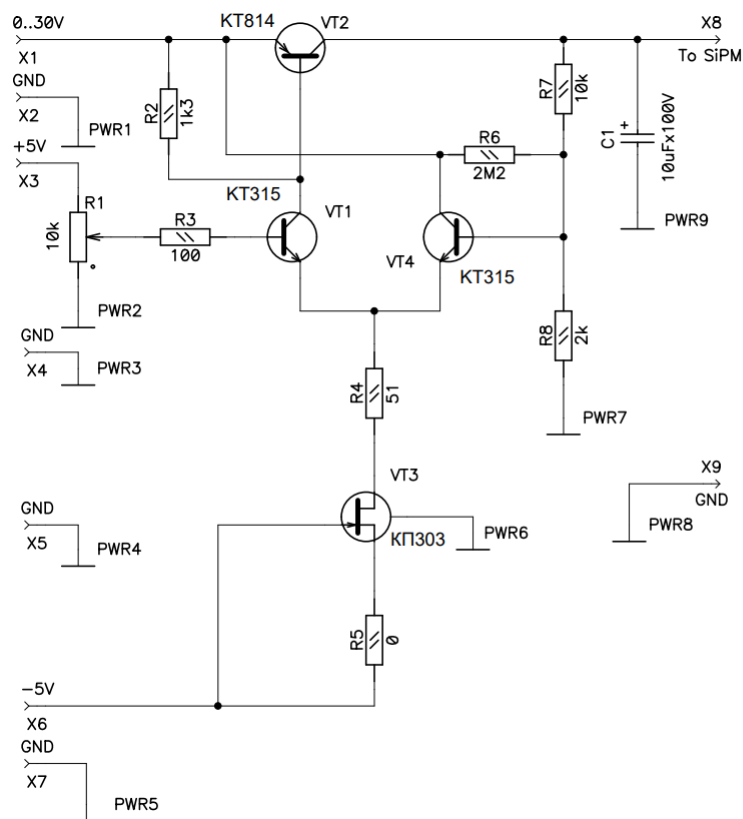


Рисунок 2.1 — Принципиальная схема подстройки напряжения на базе дифференциального каскада

Данный вариант исполнения подстройки является очень удачным в связи с возможностью регулирования в полном диапазоне напряжений (0..30В), а также высокой стабильностью и линейностью. Однако такая схема оказывается затратной и сложной в исполнении в связи с большим числом электронных компонентов и необходимостью их тщательной подборки для её корректной работы. В то же время для точного выставления напряжения на выходе необходимо ис-

пользовать дополнительные измерительные приборы, что может быть не очень удобно.

Для разрешения недочётов предыдущего решения по подстройке напряжений было принято решение модифицировать существующую схему, уйдя от использования в ней дифференциального каскада в пользу операционного усилителя, введя возможность управления выходным напряжением и мониторинга его значения при помощи микроконтроллера.

2.1 СХЕМА ПОДСТРОЙКИ НАПРЯЖЕНИЙ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Для упрощения схемы подстройки напряжения на канале было принято решение рассмотреть возможность использования операционного усилителя. В связи с серьёзными ограничениями по питанию для работы по подстройке в полном диапазоне напряжений (в т.ч. и сверху) необходимо использовать операционный усилитель класса 'Rail-to-Rail'.

К данному классу операционных усилителей относятся компоненты, способные усиливать входное напряжение в полном диапазоне, достигающим напряжение питания. Для наших целей мог бы подойти AD822AN с напряжением питания до 32В. Принципиальная схема для подстройки напряжений на два канала изображена на рисунке 2.2.

В таком исполнении схема управления напряжением на канале представляет собой операционный усилитель в неинвертирующем включении. На вход подаётся управляющее напряжение в диапазоне 0..5В, делится пополам при помощи резистивного делителя и подаётся на неинвертирующий вход операционного усилителя. Коэффициент усиления выбирается за счёт резисторов обратной связи и составляет $k = \frac{R_7}{R_5} + 1 = 14$. Заметим, что коэффициент усиления подобран с запасом для возможности управления неполным выходным напряжением ($\frac{30}{14} \approx 2.14$ В), что обеспечивает более точную регулировку.

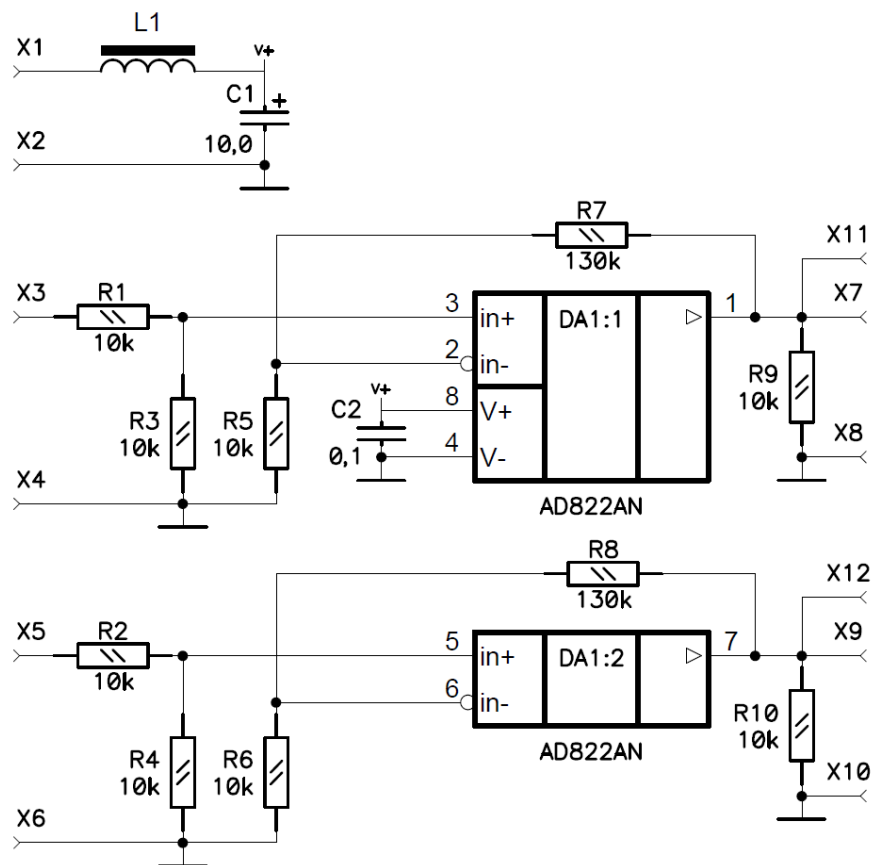


Рисунок 2.2 — Принципиальная схема подстройки напряжения на базе операционного усилителя

Однако, данное решение оказалось нерабочим по нескольким причинам:

- 1) Данный класс операционных усилителей не способен корректно работать в режиме однополярного питания, что недопустимо для нашей задачи
- 2) При выходе на напряжение питания операционный усилитель возбуждается и вносит в питание нежелательные колебания с частотой $f \sim 1$ кГц, что также оказывается недопустимым для нашей задачи.

Устранение проблемы может решаться выбором аналогичного операционного усилителя с большим напряжением питания, например AD823 с напряжением питания +36В, но не может гарантировать аналогичной ситуации с возбуждениями, что ставит под вопрос данный способ регулирования.

2.2 МОДИФИКАЦИЯ СХЕМЫ ПОДСТРОЙКИ НАПРЯЖЕНИЯ

Не смотря на неудачу со значительным упрощением схемы подстройки напряжения до операционного усилителя с обвязкой, было принято решение упростить уже имеющуюся схему, заменив часть дифференциального каскада на операционный усилитель. Принципиальная схема для двух каналов в таком исполнении представлена на рисунке 2.3.

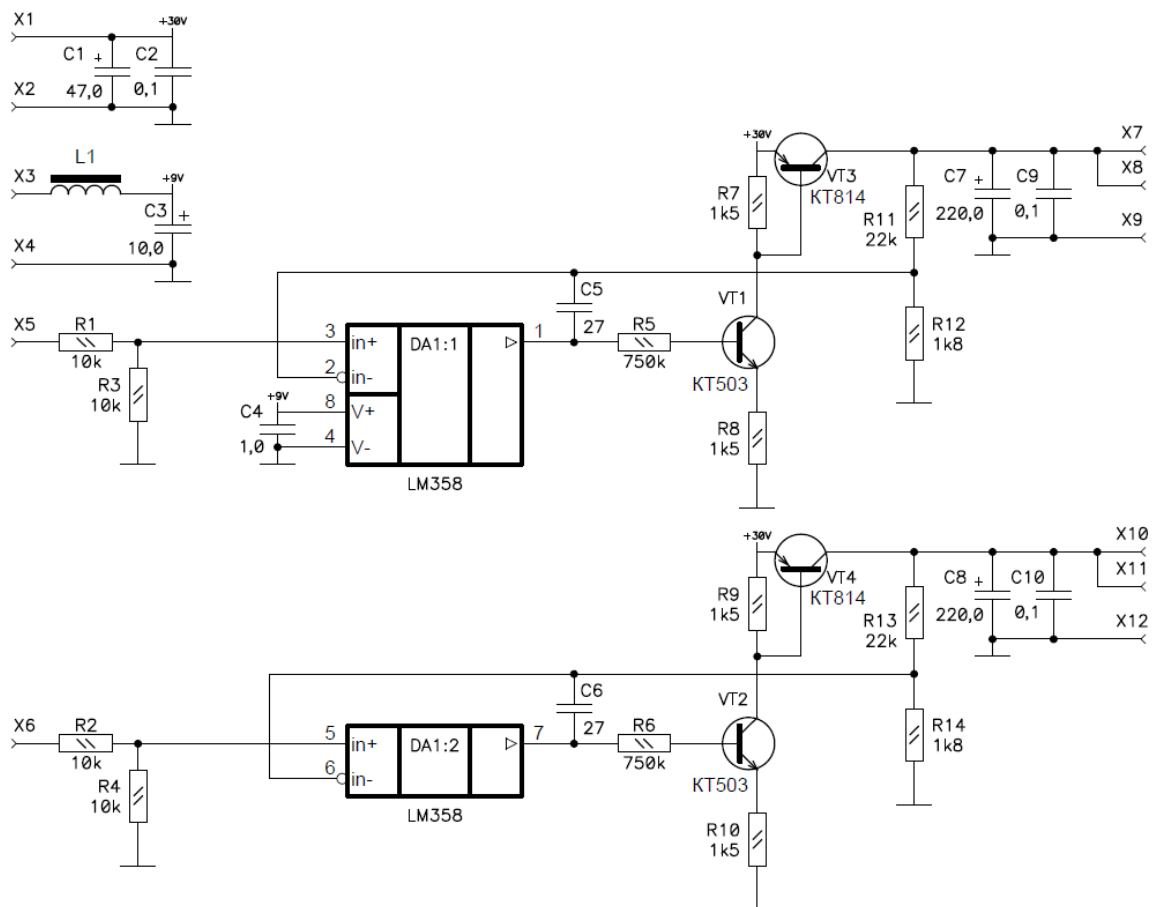


Рисунок 2.3 — Модифицированная схема подстройки напряжения на базе операционного усилителя

В качестве операционного усилителя использован LM358 от компании Texas Instruments. Данный компонент не является представителем класса 'Rail-to-Rail', но полностью подходит для данного случая, а также зарекомендовал себя как надёжное рабочее устройство во многих проектах. В таком включении операционный усилитель выступает в роли неинвертирующего, (в качестве обратной связи служат пары резисторов R11 и R12, а также R13 и R14 соот-

ветственно), а конденсаторы $C5$ и $C6$ необходимы для устранения возможных возбуждений (на экспериментальном образце не применяются, схема ведёт себя очень стабильно). Так как управляющий транзистор управляется током, на выходе операционного усилителя устанавливаются транзисторы $VT1$ и $VT2$. В случае повышения напряжения на входе операционного усилителя, транзистор $VT1$ (или $VT2$) открывается сильнее, что влечёт за собой открытие транзистора $VT3$ (или $VT4$) и увеличение напряжения на выходе схемы.

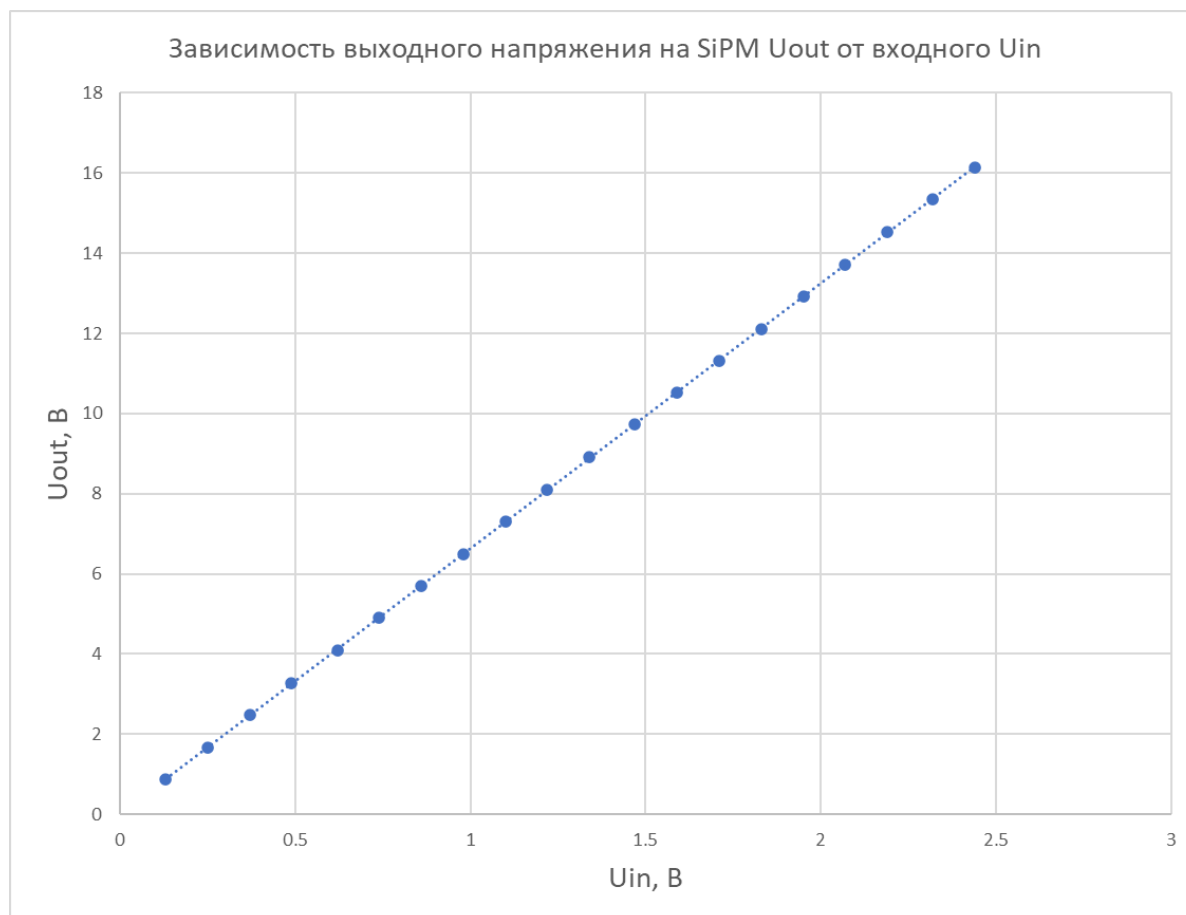


Рисунок 2.4 — Зависимость выходного напряжения U_{out} схемы подстройки напряжения от входного управляющего напряжения U_{in}

Как видно из рисунка 2.4, схема обладает высокой линейностью и стабильностью на всём диапазоне подстройки напряжений, что позволяет нам применять её в нашей работе.

2.3 ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДСТРОЙКОЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Не смотря на отличные характеристики предложенной схемы, испытание на разных каналах показало, что реакция на одно и то же управляющее воздействие оказывается различной, что принципиально неудобно для нашего решения. Для компенсации возможных отклонений необходимо применить цифровое управление с внедрённой обратной связью, благодаря которой можно включить необходимую калибровку.

2.3.1 МЕХАНИЗМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

На рисунке 2.5 представлен механизм цифровой подстройки напряжения на канале при помощи микроконтроллера.

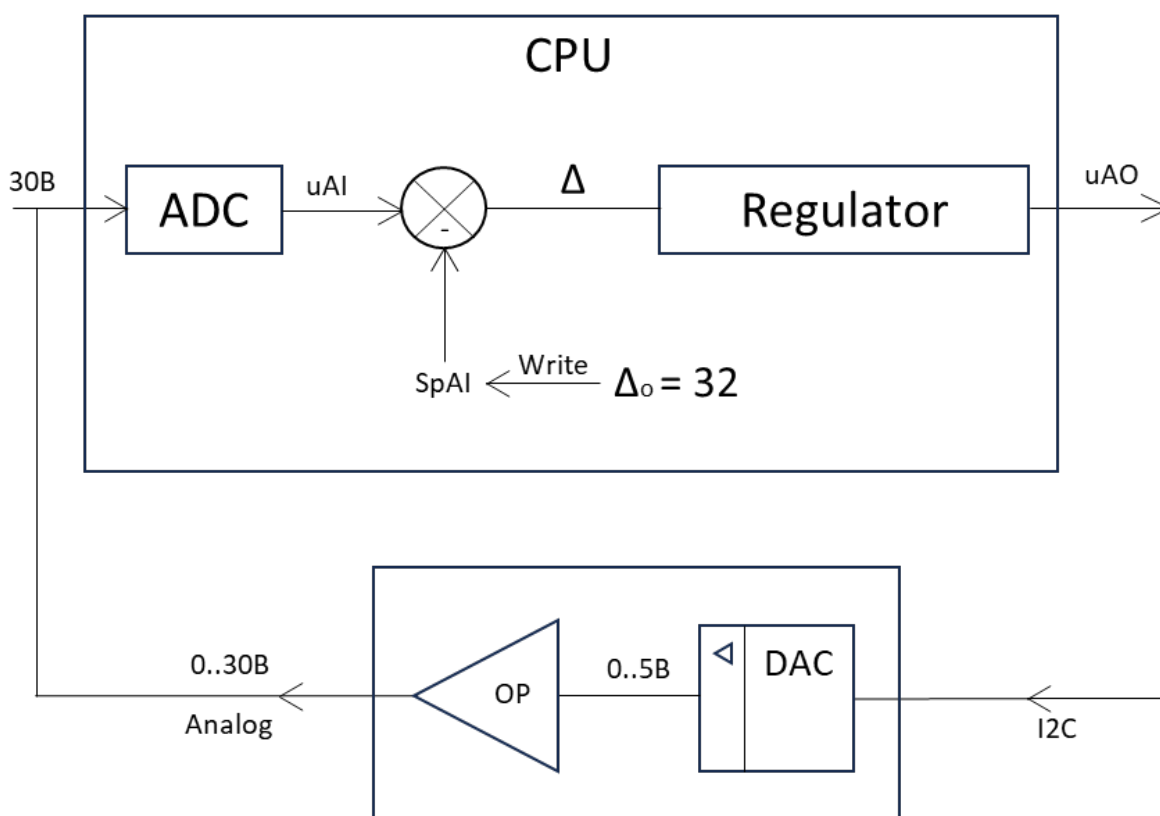


Рисунок 2.5 — Механизм цифровой подстройки напряжений на канале при помощи микропроцессора

Пользователь задаёт код аналого-цифрового преобразователя (ADC) SpAI, необходимый для выставления на выходе схемы подстройки. Выходное напря-

жение с платы подстройки отправляется на вход ADC и преобразуется в цифровой код uAI , который сравнивается с заданным $SpAI$. В случае их различия, микроконтроллер передаёт соответствующее управляющее воздействие Δ , которое прибавляется или вычитается от текущего кода цифро-аналогового преобразователя (DAC). Изменённый код uAO отправляется на DAC через протокол I2C, который подаёт соответствующее напряжение в диапазоне 0..5 В на вход платы. В случае перехода регулятором через ожидаемое выходное напряжение управляющее воздействие уменьшается в два раза и инвертируется. Процесс регулирования продолжается до того момента, пока выходное напряжение не сравняется с ожидаемым. Процесс регулирования представлен на рисунке 2.6.

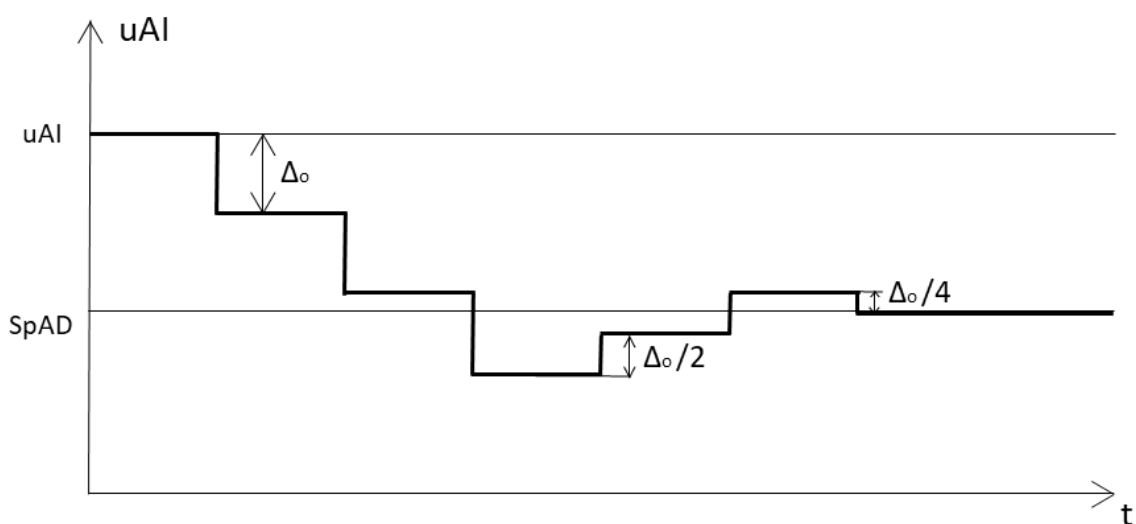


Рисунок 2.6 — Зависимость выходного напряжения схемы от времени, за Δ_0 управляющее воздействие в 32 единицы, деление на два осуществляется путём битового сдвига на 1

Заметим, что микроконтроллер занимается только выставлением соответствующего кода DAC, вся калибровка соответствующих преобразований находится на стороне программного обеспечения, исполняющегося на компьютере.

2.3.2 ПОДБОР НЕОБХОДИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Для осуществления задуманного механизма управления подстройкой напряжений необходимо подобрать соответствующую электронику, при помощи которой будут осуществляться выставления соответствующих напряжений на входе платы, а также сама процедура подстройки.

В качестве микроконтроллера используется восьмибитный ATmega-328P с тактовой частотой 16МГц. За счёт своей простоты и дешевизны данные микропроцессоры позволяют применять их для простых и некоторых сложных задач. В нашем случае, мы применим данный контроллер для управления напряжением на DAC, а также для взаимодействия нашей электроники с персональным компьютером.



Рисунок 2.7 — Arduino nano

Установленный на борту микропроцессор обладает большим числом разнообразных интерфейсов для взаимодействия с различной электроникой и внешними устройствами, что значительно расширяет выбор необходимой электроники. Так, взаимодействие с DAC можно осуществлять при помощи протокола I2C, а данные с контроллера можно транслировать на ЭВМ через RS232 интерфейс (COM), сохраняя и обрабатывая при помощи специально разработанного программного обеспечения.

Как было сказано ранее для выставления напряжения на входе схемы подстройки удобно использовать DAC. Данное устройство преобразует входные цифровые коды в соответствующее им выходное напряжение в пределах напряжения питания. Для наших нужд был выбран 12-разрядный DAC MP4502, связывающийся с микроконтроллером при помощи протокола I2C, за счёт которого можно как читать, так и записывать информацию в DAC. Принципиальная схема платы для цифро-аналогового преобразователя представлена на рисунке 2.8.

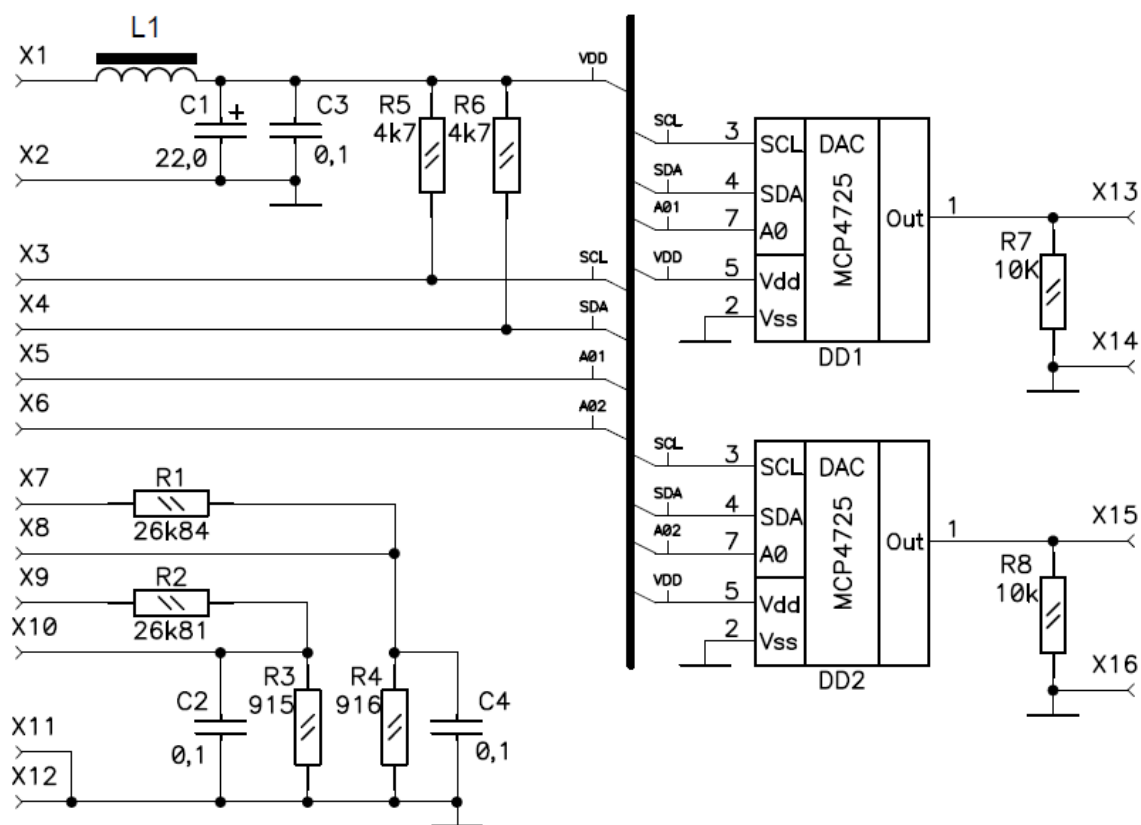


Рисунок 2.8 — Принципиальная схема платы для цифро-аналогового преобразователя MCP4725

Для обеспечения обратной связи на плате DAC распаян резистивный делитель (R1 и R4, R2 и R3), сигнал с которых идёт на встроенный в ATmega 10-битовый аналогово-цифровой преобразователь. Контроль температуры и влажности осуществляется при помощи датчика AM2302.

Общая физическая схема подстройки напряжения для двух каналов представлена на рисунке 2.9.

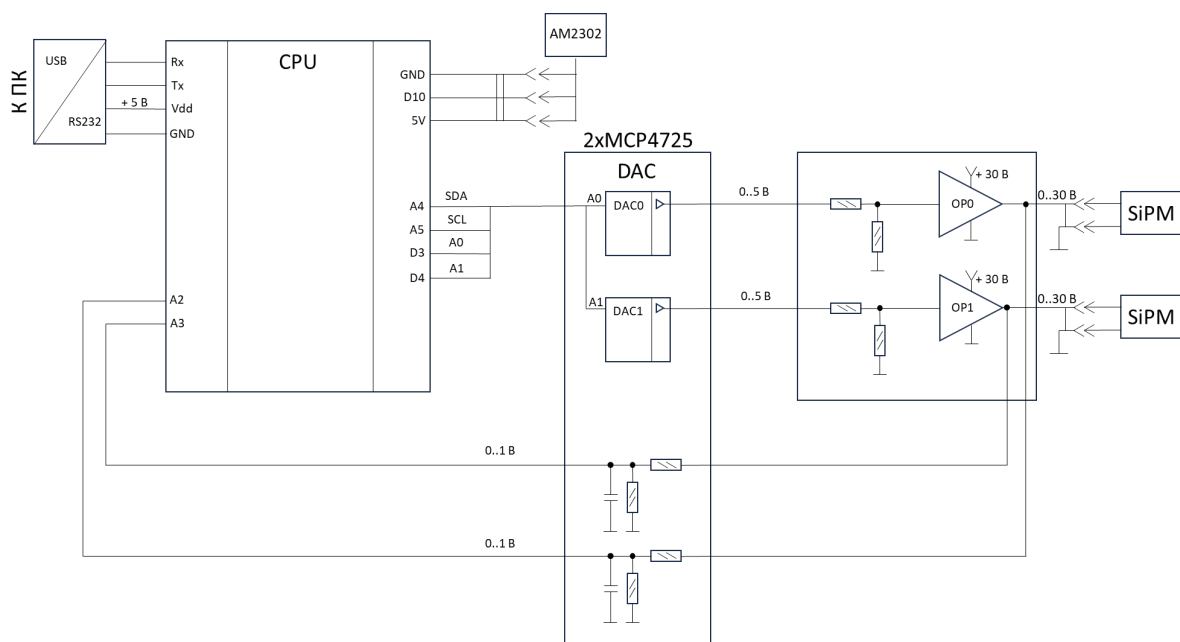


Рисунок 2.9 — Общая структурная схема подстройки напряжения для двух каналов

2.3.3 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для взаимодействия с платой при помощи персонального компьютера было написано диалоговое приложение на языке C++ на основе Microsoft Foundational Classes (MFC). При помощи данного программного обеспечения осуществляется механизм подстройки напряжений, а также мониторинг напряжений на каналах и контроль температуры. Перейдём к рассмотрению интерфейса приложения.

При запуске программного обеспечения открывается диалоговое окно:

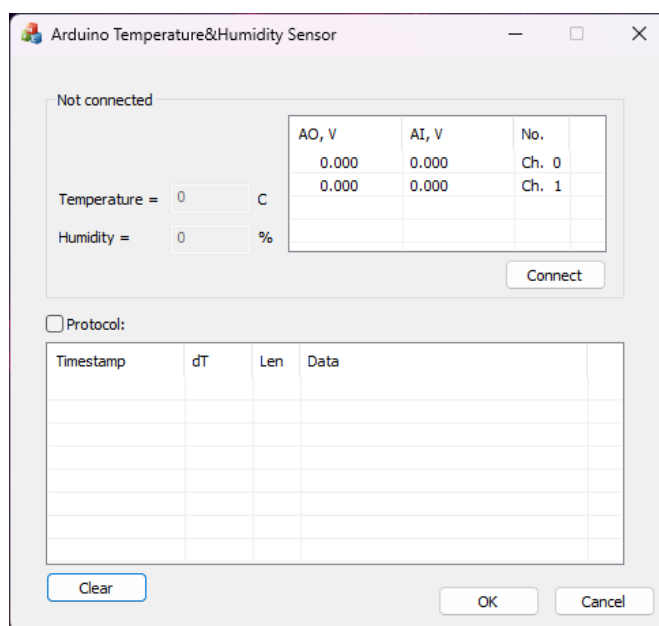


Рисунок 2.10 — Основное диалоговое после запуска программы

В верхнем блоке окна расположены данные с датчика температуры и температуры и влажности (слева), а также информация с каналов установки (справа). В нижней части опционально отображаются передаваемые по протоколу RS232 пакеты. В момент подключения информации о тех или иных приборах не поступает, так как необходимо установить соединение с микроконтроллером, нажав на кнопку "Connect". После выбора устройства начинает поступать статистика и можно осуществлять регулирование (рисунок 2.11).

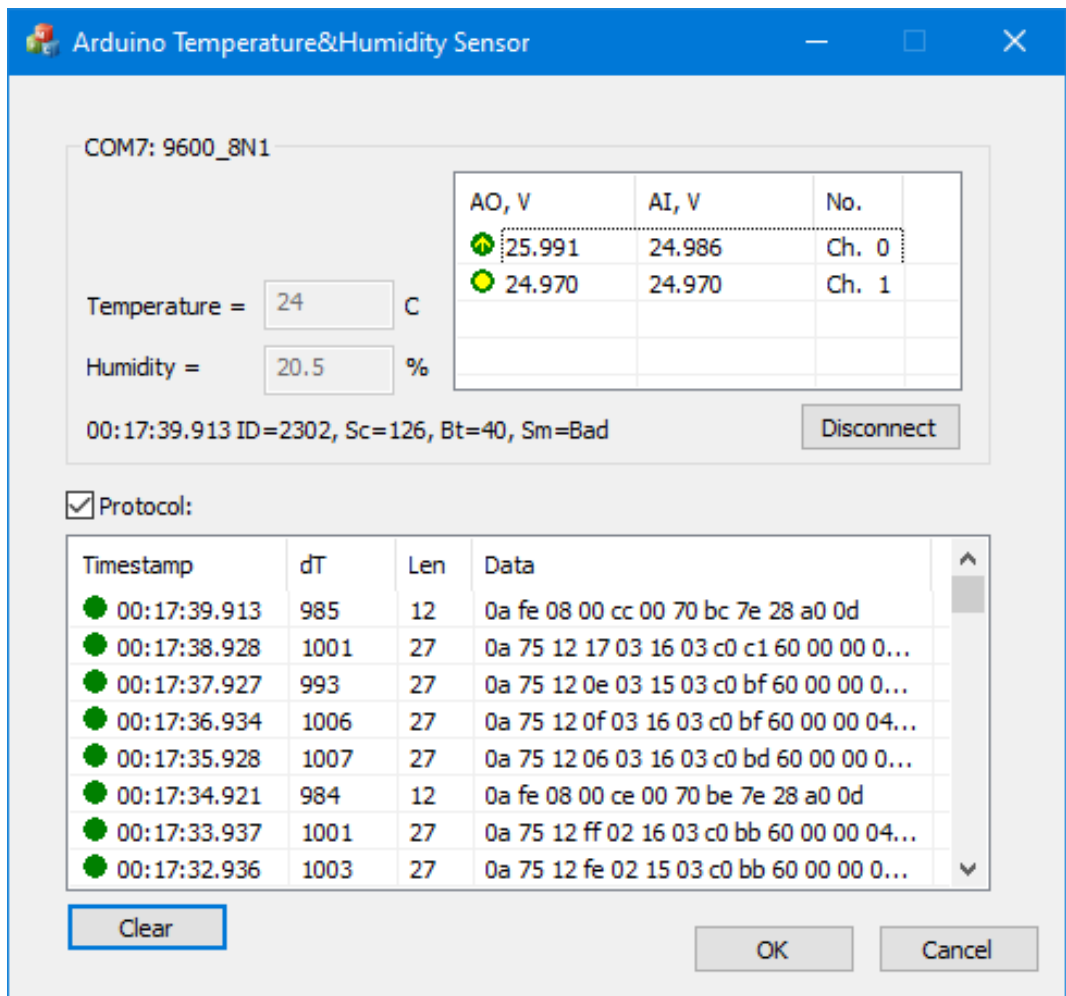


Рисунок 2.11 — Основное диалоговое после запуска программы

Выбор управляемого канала осуществляется двойным нажатием по нему в таблице. В результате открывается новое диалоговое окно, изображённое на рисунке 2.12.

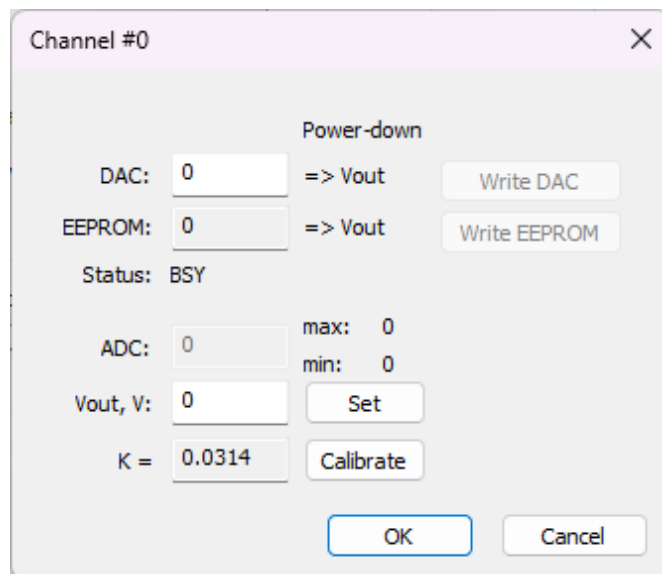


Рисунок 2.12 — Основное диалоговое после запуска программы

Программное обеспечение поддерживает выставление желаемого напряжения, преобразующегося в необходимый код ADC посредством предварительной калибровки, а также выставление необходимого кода цифро-аналогового преобразователя. Заметим, что при выставлении кода DAC механизм регулирования не поддерживается, и скорость подстройки зависит только от физических характеристик электроники (скорости канала связи в случае увеличения, и времени разрядки RC-цепочки в противном случае). При этом регулирование кода DAC производится не чаще, чем раз в 1 секунду, что связано с необходимостью завершения всех переходных процессов, а также в том случае, если разница кодов ADC между соседними измерениями не превышает 4 единицы.

2.4 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Тестирование схемы подстройки производилось при помощи установки, применяемой ранее во время подготовки дипломной работы. На рисунке 2.13 представлена блок-схема установки. В подготовленный чёрный ящик помещается исследуемая сборка из сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Питание осуществляется внешним лабораторным источником питания, а в качестве источника сигнала может быть использован как изотоп, так и светодиод. Сигнал с SiPM передаётся в электронный тракт на основе аппаратуры CAEN из учебного набора (оцифровщик, усилитель и анализатор импульсов) [15]. Данное оборудование создано специально для работы с различными кремниевыми фотоумножителями и является удобным и компактным решением. Так, сигнал с SiPM передаётся на усилитель, а затем разветвляется и направляется на дискриминатор, формирующий временные ворота, и анализатор импульсов, который также получает данные с дискриминатора. Установка позволяет собирать как дифференциальные, так и интегральные спектры, а с прямым подключением к ЭВМ отображать их в реальном времени в прилагаемом ПО. Контроль температуры осуществляется при помощи термодатчика AM2302.

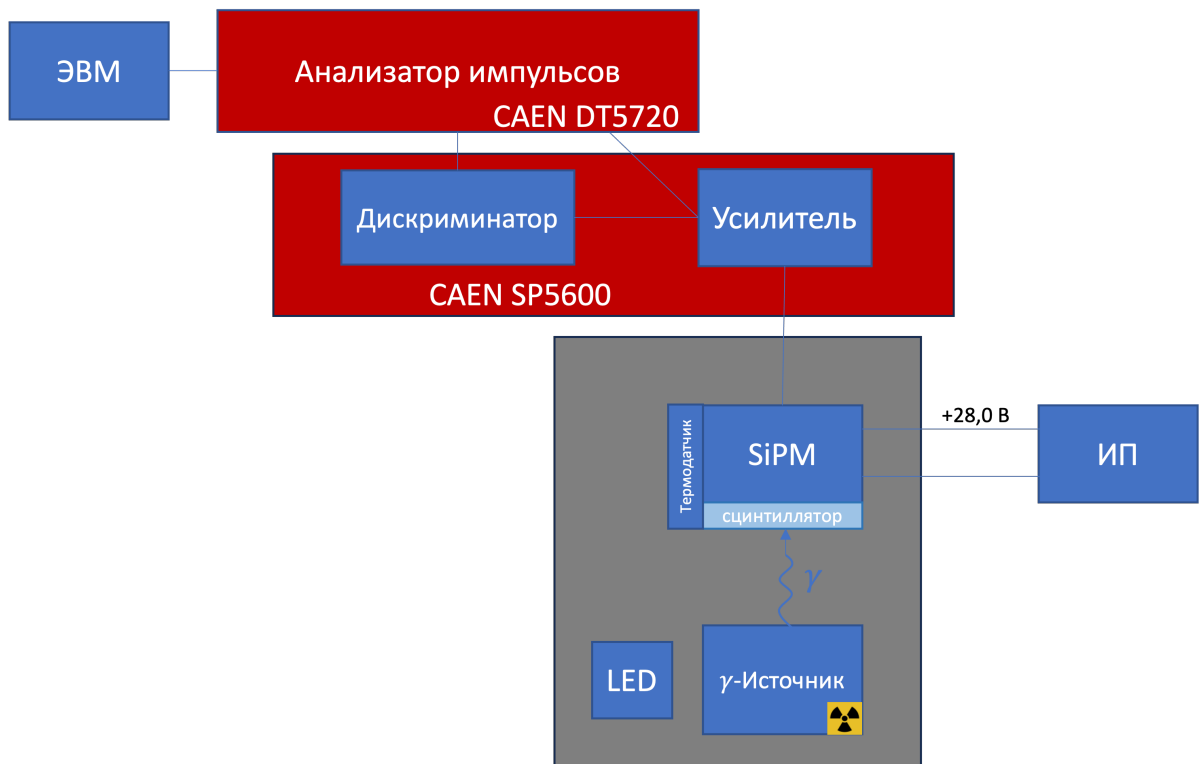


Рисунок 2.13 — Принципиальная схема установки

В схему питания между SiPM и источником питания включена схема подстройки напряжений, изображённая на рисунке 2.14.

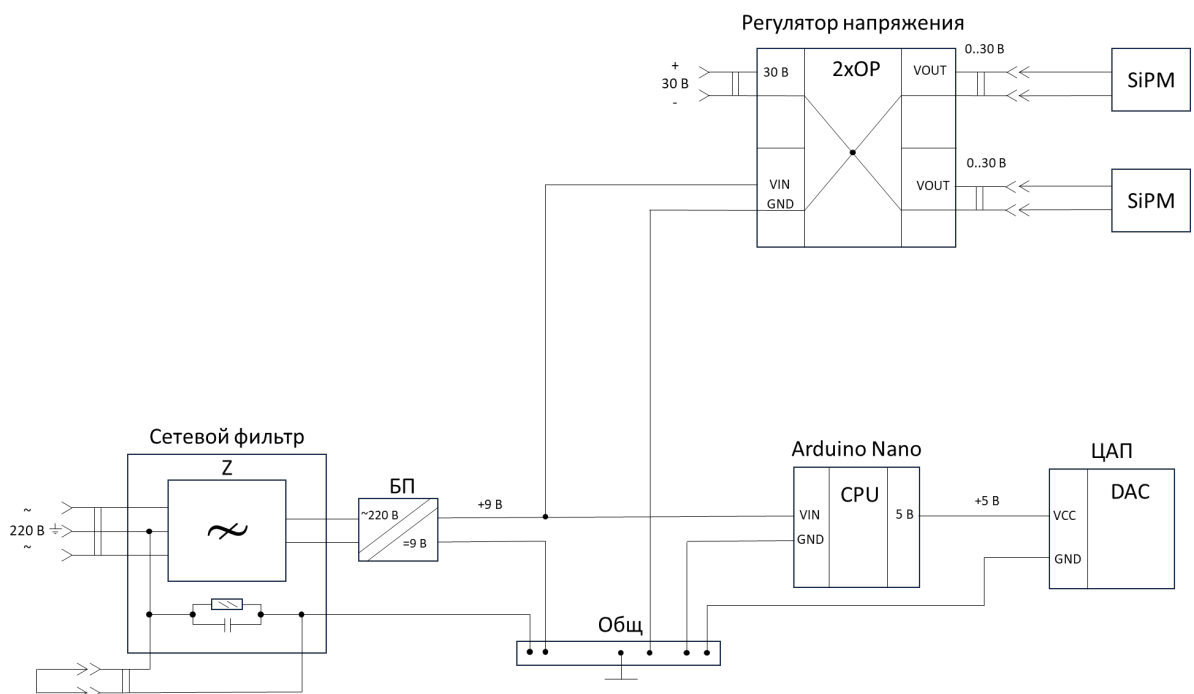
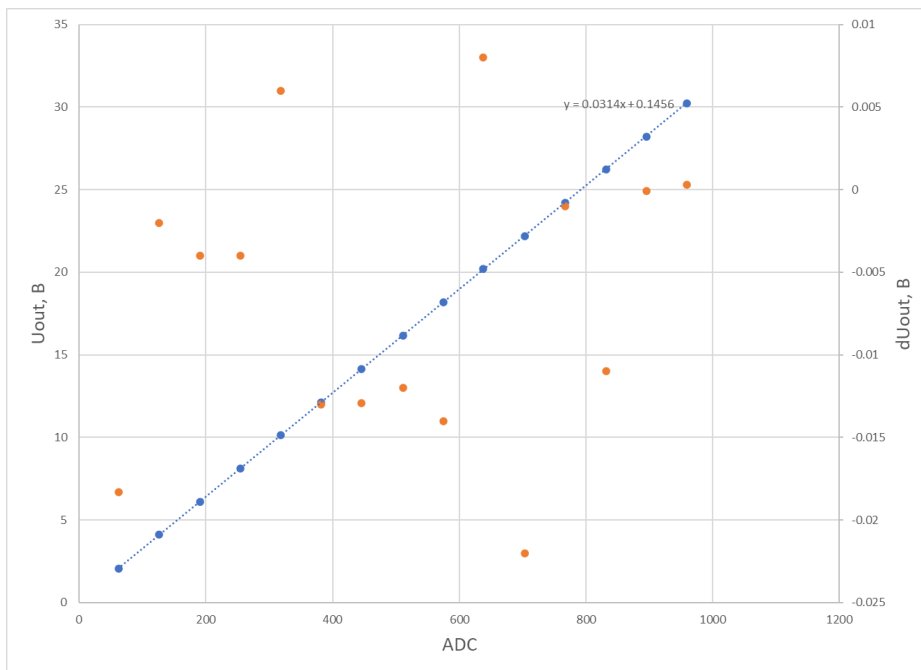


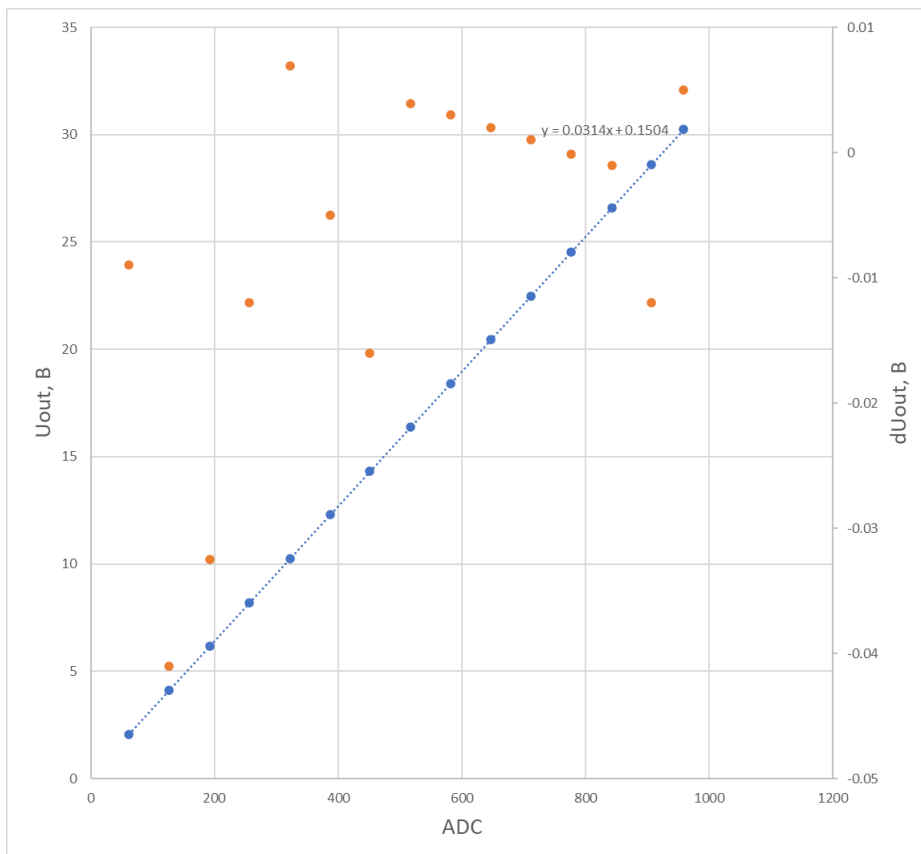
Рисунок 2.14 — Принципиальная схема установки

Для начала была проведена первичная калибровка установки для расчёта необходимых коэффициентов преобразования. Для этого без подключения

к детектору была снята зависимость выходного напряжения от кода ADC, а также получено отклонение между показаниями стороннего прибора и результатами измерений схемой подстройки от кода ADC для обоих каналов (рисунок 2.15). Как видно из рисунков, включение нашей схемы в установку не повлияло на линейность, а вычисленные коэффициенты позволили провести калибровку каналов.



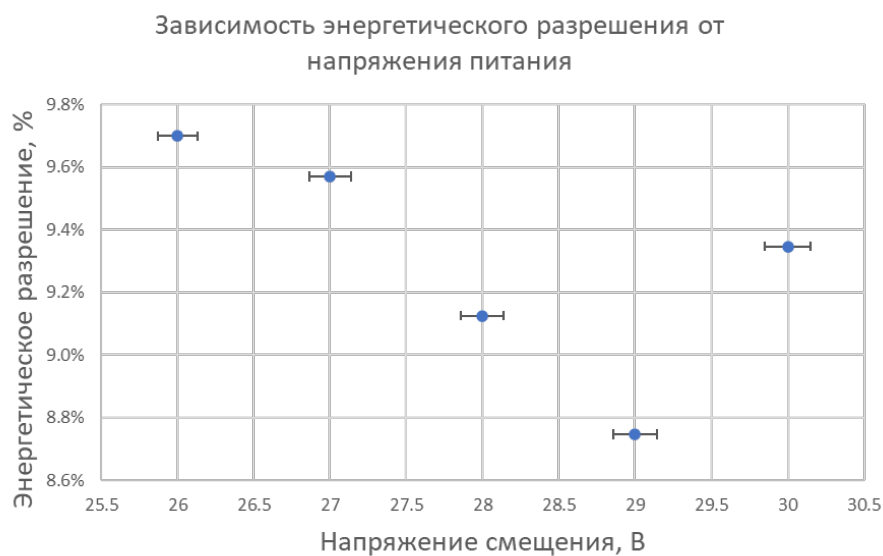
а



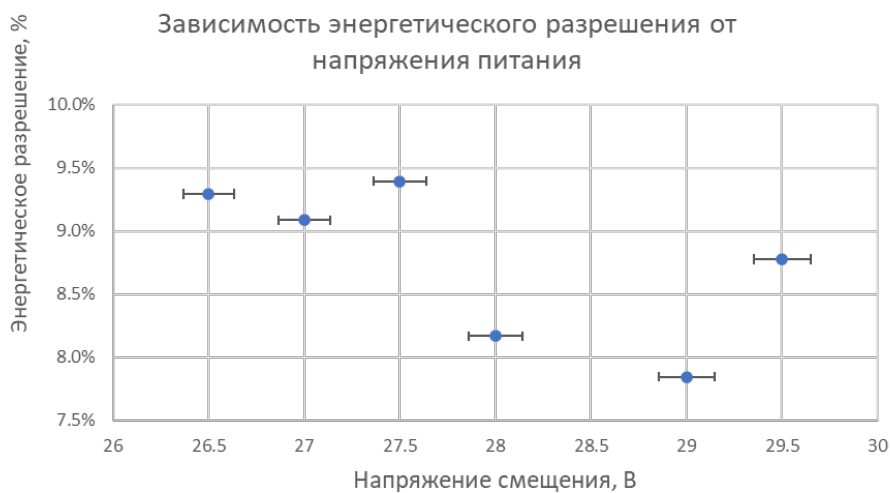
б

Рисунок 2.15 — Зависимость выходного напряжения на канале и отклонения измеренного схемой от реально в зависимости от кода ADC для канала 1 (а) и 2 (б)

Для проверки влияния нашей схемы подстройки на работоспособность установки в целом, для разных выходных напряжений питания была снята зависимость энергетического разрешения, в качестве источника излучения применялся радиоактивный изотоп цезий-137 с энергией вылетающих гамма-квантов 662 кэВ.



а



б

Рисунок 2.16 — Зависимость энергетического разрешения на канале установки от подаваемого напряжения для схемы с операционным усилителем (а) и на базе дифференциального каскада (б)

Сравнивая полученные значения энергетического разрешения с предыдущими нетрудно заметить, что характер зависимости совпадает с полученным ранее с другими схемами подстройки напряжений, что позволяет говорить о

возможности масштабирования такого решения и его применения и на остальных каналах.

2.5 ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ

Текущее решение подстройки напряжений на каналах, не смотря на свои хорошие характеристики, может быть в дальнейшем доработано.

Во-первых, для упрощения и удешевления производства необходимо решить вопрос с операционным усилителем класса 'Rail-to-Rail' и полностью перейти на применение такого способа регулирования. В качестве альтернативы протестированному компоненту, может быть применён его аналог с напряжением питания до 36В, что скомпенсирует недостаток по напряжению питания сверху, а также, потенциально, сильнее улучшит стабильность установки.

Во-вторых, текущий способ регулирования хоть и является подходящим по времени, но не является оптимальным. Для полной оптимизации подстройки необходимо реализовать алгоритм ПИД-регулирования, что позволит с высоким быстродействием подстраивать значение выходного напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена разработке метода подстройки напряжения на базе микроконтроллера ATmega328P.

Разработана схема подстройки напряжения на SiPM на базе операционного усилителя и альтернативная модификация текущей при помощи операционного усилителя. Первая схема показала плохую стабильность работы и серьёзные усложнения конструкции, в то время как вторая продемонстрировала отличную линейность работы по передаваемому напряжению, при этом сохраняя энергетическое разрешение детекторов при различных напряжениях питания.

Для модифицированной схемы подстройки напряжения представлено цифровое управление на базе микроконтроллера ATmega328P и 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя. Разработано приложение для персонального компьютера для взаимодействия с электроникой и выставления требуемых напряжений. Проведена соответствующая калибровка измерительных каналов для корректной работы программного обеспечения. Показано, что предложенное решение не зависит от электроники подстройки, так как вся логика выставления кодов находится только на стороне программного обеспечения. Схема имеет возможность к масштабированию и возможной модификации в виде перехода на более простую электронику, а также совершенствования механизма подстройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зыков Е. М., Поздняков А. В., Костеников Н. А.* Рациональное использование ПЭТ и ПЭТ-КТ в онкологии // Практическая онкология. — 2014. — Т. 15, № 1. — С. 31.
2. *Deans S. R.* The Radon transform and some of its applications. — Courier Corporation, 2007.
3. *Рудас М. С., Насникова И. Ю., Матякин Г. Г.* Позитронно-эмиссионная томография в клинической практике // М.: Центральная клиническая больница УДП РФ. — 2007.
4. Позитронная эмиссионная томография в онкогинекологии / Д. Рыжкова [и др.] // Сибирский онкологический журнал. — 2013. — 2 (56). — С. 77—83.
5. *Беляев В., Климанов В.* Физика ядерной медицины: учеб. пособие // М.: НИЯУ МИФИ. — 2012.
6. *Корнеев А. И.* Универсальная модель световыхода пластмассовых и жидких органических сцинтилляторов для электронов и тяжёлых заряженных частиц // Факультет экспериментальной и теоретической физики НИЯУ МИФИ. — 2007. — С. 40.
7. *Crystals S.-G.* Physical properties of common inorganic scintillators // Saint-Gobain Crystals. — 2007.
8. The digital silicon photomultiplier — Principle of operation and intrinsic detector performance / Т. Frach [и др.] // 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC). — 2009. — С. 1959—1965.
9. *Jeong M., Hammig M.* Development of hand-held coded-aperture gamma ray imaging system based on GAGG(Ce) scintillator coupled with SiPM array // Nuclear Engineering and Technology. — 2020. — Т. 52, № 11. — С. 2572—2580. — ISSN 1738-5733.

10. Comparison between Pixelated Scintillators: CsI(Tl), LaCl₃(Ce) and LYSO(Ce) when coupled to a Silicon Photomultipliers Array / M. Jeong [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — Т. 893. — С. 75—83. — ISSN 0168-9002.
11. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. — Дубна : ОИ-ЯИ, 2014. — С. 323.
12. *Sensors C.-S. S.* Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive // On Semiconductor. — 2020.
13. *Konotop A., Boyko N.* INSTALLATION FOR TESTING SILICON PHOTOMULTIPLIER AND SCINTILLATION CRYSTALS // Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI». — 2023. — Т. 12(3). — С. 143—152.
14. PET prototype based on scintillation detectors GAGG-SiPM coupled to 32-channel Petiroc2A chip / F. Dubinin [и др.] // JINR AYSS international conference 2023. — 2023. — С. 1—5.
15. *CAEN.* SP5600AN Educational Kit - Premium Version Guide. — Italy : CAEN Educational, 2016. — С. 81.